
La résistance au jeune âge des bétons par la maturométrie des mortiers

O. Haddad^{1*}, S. Aggoun², V. Waller³, L. Nachbaur⁴

¹ Université Mouloud Mammeri – 15000 Tizi-Ouzou, Algérie.

² Université de Cergy-Pontoise, F-95000 Cergy-Pontoise, France.

³ UNIBETON, Les technodes - BP 2 F-78931 Guerville Cedex, France

⁴ CTG-Italcementi group, Les technodes – BP 01 78931 Guerville, France

*¹ hmwardia@yahoo.fr, ² salima.aggoun@u-cergy.fr, ³ vwaller@unibeton.fr, ⁴ lnachbaur@ctg.fr

RESUME : De nos jours la formulation des bétons est devenue compliquée par la diversification des produits proposés pour leur composition et aussi par les propriétés visées en termes de rhéologie, maturité précoce, durabilité..., tous ceux-là à moindre coût. Ainsi, le nombre d'essais à réaliser pour le tri des matériaux et le calcul des quantités à introduire dans le béton augmente en conséquence. Pour le suivi de la montée en résistance au jeune âge, habituellement on utilise la méthode de maturométrie basée sur la loi d'Arrhenius. Cependant cette technique a un coût élevé dû au nombre d'essais de résistance aux différentes températures qui sont nécessaires pour caractériser correctement le béton. Sur l'ensemble des études préliminaires, quand la formule finale du béton n'est pas décidée ce coût peut s'avérer trop élevé en argent et en temps. Dans ce travail on propose une nouvelle approche de la maturométrie qui permet à partir d'essais de résistance et de calorimétrie réalisés sur Mortier normalisés d'estimer l'évolution de la résistance au jeune âge d'un béton.

ABSTRACT: Nowadays the design of concretes became complicated by the diversification of the offered products to their composition and also by the properties aimed in terms of rheology, early maturity, durability..., all these with lower costs. So, the tests number to be realized for the selection of materials and the estimation of the quantities to be introduced into the concrete increases consequently. To follows the strength rise at early ages, usually we use the maturity method based on the Arrhenius's law. This technique has a high cost due to the strength tests number at different temperatures which are essential to characterize properly the concrete. On all the preliminary studies, when final concrete mix design is not yet decided this cost may prove to be high in either money or time. In this work we suggest a new approach of the maturity which allows from strength tests carried out on calorimetry and standardized Mortar estimate the evolution of the early strength of concrete.

MOTS-CLES : maturométrie, béton, mortier normalisé, courbes de référence, courbe de chaleur.

KEYWORDS: maturity, concrete, standardized mortar, reference curve, heat curve.

1. Introduction

La maturométrie constitue une méthode de détermination in situ de la résistance au jeune âge du béton, intégrant les effets couplés de température et de temps, par le biais de la loi d'Arrhenius. La méthode est également utilisée dans le cadre de pré-études pour la classification et/ou la sélection des bétons en fonction de leurs performances au jeune âge.

Cette méthode nécessite la connaissance de l'énergie d'activation apparente de la formule étudiée, ainsi que sa courbe de référence donnant l'évolution de la résistance au jeune âge du béton à une température de référence (usuellement 20 °C) (Aloia, 1998) (Chanvillard et al., 1994) (Calibé, 2003). Elle a toutefois un coût élevé dû au grand nombre d'essais qu'elle implique (essais de mesure de la résistance pour différentes ambiances de conservation du béton, et à de nombreuses échéances de temps).

Notre objectif dans ce travail est de proposer une méthode alternative simplifiée, donc à moindre coût, tout en ayant une précision d'un niveau acceptable. Cela devrait permettre d'utiliser la maturométrie dans des cas où elle est aujourd'hui écartée pour des raisons économiques, et où le moindre niveau de précision n'est pas rédhibitoire (pré-études, situations où la sécurité n'est pas en jeu, etc.).

Cette méthode alternative consiste à tenter d'utiliser la courbe de référence du mortier normalisé (CEN) pour prédire la courbe de référence du béton, moyennant la connaissance de la résistance à 28 jours du béton et de sa courbe de dégagement de chaleur.

2. Fondements et principes

Plusieurs études ont montré qu'il existe une relation de linéarité entre l'évolution de la résistance au jeune âge du béton et le dégagement de chaleur et donc le degré d'hydratation du béton (Beek, 2000) (Byfors, 1980) (Waller, 2000). Il en ressort que l'on peut indifféremment utiliser l'un ou l'autre des deux paramètres pour déterminer le degré d'avancement et donc la courbe de référence. Cette relation de linéarité peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} R_c(t_{\text{éq}}) = 0 & \text{si } Q(t_{\text{éq}}) \leq B \\ R_c(t_{\text{éq}}) = (Q(t_{\text{éq}}) - B)/A & \text{si } Q(t_{\text{éq}}) > B \end{cases} \quad [1]$$

Où $R_c(t_{\text{éq}})$ et $Q(t_{\text{éq}})$ sont respectivement la résistance et la chaleur d'hydratation correspondant à l'âge équivalent et à 20 °C, $t_{\text{éq}}$ temps exprimé en âge équivalent à 20 °C (heures). A et B sont deux constantes dépendant des conditions de conservation et de la nature des matériaux utilisés. Une fois les paramètres A et B connus, et sur la base de la courbe de dégagement de chaleur du béton à une

température de référence, nous pouvons alors déduire la courbe de référence pour la résistance du béton.

Or dans notre étude on souhaite éviter le travail à faire pour la courbe de référence sur les bétons on souhaite le remplacer par une courbe de référence sur les mortiers. Pour y parvenir, nous devons modifier légèrement l'équation 1 précédente. En effet la substitution du mortier au béton change la valeur de la résistance finale atteinte ainsi que celle de la chaleur dégagée lors de la maturation, ce qui modifie les rapports de linéarité entre les deux paramètres. Toutefois, ces changements auront une influence analogue sur la cinétique d'évolution de la résistance au jeune âge et du dégagement de chaleur. C'est la raison pour laquelle l'équation précédente a été changée en remplaçant les valeurs de la chaleur dégagée et des résistances atteintes par des variables réduites c'est-à-dire en les divisant respectivement par la chaleur finale (Q(inf)) et la résistance à 28 jours (Rc28j). L'équation 1 devient :

$$\begin{cases} \frac{Rc(téq)}{Rc(28j)} = 0 & \text{si } \frac{Q(téq)}{Q(inf)} \leq b \\ \frac{Rc(téq)}{Rc(28j)} = \frac{\frac{Q(téq)}{Q(inf)} - b}{a} & \text{si } \frac{Q(téq)}{Q(inf)} > b \end{cases} \quad [2]$$

a et b : paramètres de la nouvelle droite qui relie les variables réduites.

De cette façon, nous pouvons considérer que le passage du béton au mortier ne change pas significativement le rapport de linéarité existant entre l'évolution de la résistance mécanique et celle du dégagement de chaleur.

Par ailleurs, il a été constaté que les paramètres a et b pourraient rester les mêmes pour des formules utilisant le même ciment, car les réactions d'hydratation dépendent essentiellement de la nature du ciment, particulièrement pour les compositions à rapport E/C différents (Haddad, 2007). Ce résultat nous permet d'avancer également que l'on peut utiliser indifféremment le béton ou le mortier normalisé CEN pour déterminer a et b.

En utilisant l'équation 2 ce résultat se traduit par :

$$Rc(téq)(Béton) = Rc28jbéton \times \frac{(Q(téq)/Qinf) - b}{a} \quad [3]$$

Exprimé ainsi, ce résultat est très intéressant. En effet, par l'équation 3 il suffit alors d'utiliser le mortier CEN pour calculer les paramètres a et b à partir d'une courbe de référence établie sur mortier CEN. Pour la résistance à 28 jours du béton on peut l'obtenir soit expérimentalement ou bien par utilisation d'un modèle d'estimation de la résistance à 28 jours (exemple du modèle de Bolomey). Le travail se résumera donc à faire la courbe de dégagement de chaleur sur béton pour calculer le rapport Q(téq)/Qinf.

3. Programme expérimental

Dans le tableau 1 suivant sont données les compositions des différentes compositions de bétons qui ont servi à notre étude. Nous avons testé trois bétons autoplaçants et quatre bétons vibrés.

	BAPFC1	BAPFC2	BAPCV	BO4	BO5	BO6	BO7
Nature de ciment	CEMI ¹	CEMI ¹	CEMI ¹	CEMI ²	CEMI ²	CEMII	CEMII
Ciment	335	450	375	320	360	320	360
E efficace/C	0,6	0,42	0,47	0,6	0,6	0,6	0,6
Filler Calcaire	118	180	/	/	/	/	/
Cendres volantes	/	/	224	/	/	/	/
Sable (1)	829			/	/	/	/
Sable (2)		651,3	651,3				
Sable (3)	/	/	/	796	753	796	753
Grav (D14)	860	/	/	/	/	/	/
Grav (D20)	/	899	899	/	/	/	/
Grav (D22)	/	/	/	1009	955	1009	955
Eau totale	197	186	171	198	222	198	222
Superplastifiant	7,2	4,5	4,5	1,12	1,26	1,1	1,3
Fluidifiant	0,8	/	/	/	/	/	/

Tableau 1. Compositions des différents bétons (kg/m^3).

Note 1 : les ciments utilisés pour ces bétons sont de la même provenance, mais de lots d'arrivage de 18 mois d'écart. Nous avons alors testé deux CEN. Note 2 : le ciment de ces bétons est d'une provenance différente de celui des BAP.

Le dosage en superplastifiant est exprimé en pourcentage de la masse du ciment, celui du fluidifiant est exprimé en pourcentage de la masse des fines.

Le mortier CEN se caractérise par un rapport E/C égal à 0,5 conformément à la norme EN 196-1. Dans le tableau 2 sont indiquées les appellations des CEN correspondants aux bétons.

Bétons	BAPFC1	BAPFC2	BAPCV	BO4	BO5	BO6	BO7
Mortiers normalisés (CEN)	CEN71	CEN3	CEN3	CEN1	CEN1	CEN2	CEN2

Tableau 2. Nomenclature des formules de béton et CEN leurs correspondants.

Pour valider notre démarche, nous avons réalisé sur l'ensemble des matériaux (bétons et CEN) le même programme expérimental : courbes d'étalonnage sous trois histoires thermiques différentes, courbe de dégagement de chaleur et résistances à la compression à 28 jours. Dans cet article on ne détaille qu'un seul exemple de

résultats sur le CEN3. Les résultats des autres produits peuvent être consultés en référence (Haddad, 2007).

Le suivi de dégagement de chaleur des CEN est effectué par la méthode calorimétrique semi-adiabatique avec une bouteille de Langavant selon la norme Française NF EN 196-9. Dans le cas des bétons, nous avons utilisé des caissons quasi-adiabatiques « méthode calorimétrique semi-adiabatique QAB » (Calibé, 2003).

4. Exploitation des résultats et discussion

Sur la figure 1 nous avons représenté les résultats de résistance mécanique au jeune âge du CEN3 et les courbes de suivis thermiques en fonction de l'âge réel sous trois niveaux de température (10, 20 et 30°C). Les échéances d'écrasement des éprouvettes peuvent être lues sur la figure 1 gauche. Un suivi thermique avec thermocouple a été réalisé pour toutes les ambiances.

Sur la figure.1 droite sont représentées : la courbe de dégagement de chaleur et celle de l'histoire thermique en condition semi-adiabatique du CEN3.

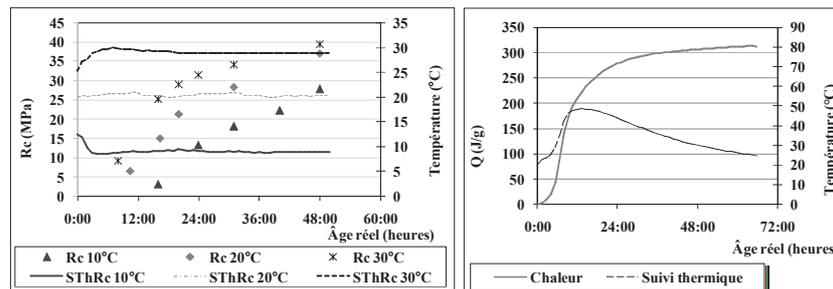


Figure 1. (Gauche) résistances à la compression et histoires thermiques du CEN3 confectionné sous 3 ambiances en fonction de l'âge réel ; (droite) courbe de chaleur cumulée et suivi de la température du CEN3 en fonction de l'âge réel.

Les résultats de la figure 1 sont utilisés pour établir la courbe de référence du CEN et au calcul de son énergie d'activation apparente (E_a) (figure 2 α).

4.1. Calcul des paramètres a et b

Pour le calcul des paramètres a et b nous avons besoin de la courbe de référence du CEN et de sa courbe de dégagement de chaleur cumulée. Ainsi, sur la figure 2 α) et β), les résistances mécaniques et la courbe de chaleur du CEN3 sont représentées

en fonction de l'âge équivalent à 20°C, après avoir calculé l'énergie d'activation par la méthode de superposition (Calibé, 2003).

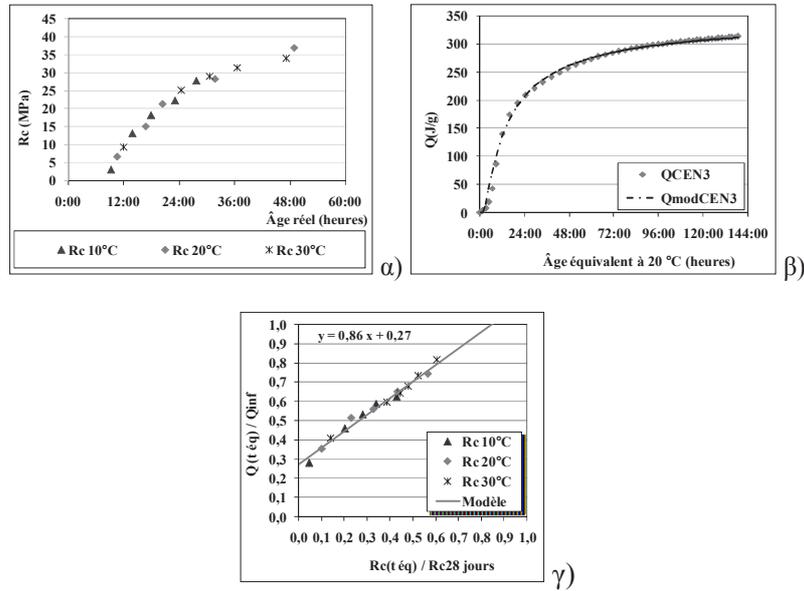


Figure 2. (α) Courbes de référence du CEN3 en fonction de l'âge équivalent (β) chaleur dégagée du CEN3 en fonction de l'âge équivalent ; (γ) Corrélation entre variables réduites $Q(t_{\text{ég}})/Q_{\text{inf}}$ en fonction de $R_c(t_{\text{ég}})/R_{c28j}$ du CEN3

En « supprimant » les axes du temps entre les deux courbes de la figure 2 (α) et (β) et en exprimant $(Q(t_{\text{ég}})/Q_{\text{inf}})$ en fonction de $(R_c(t_{\text{ég}})/R_{c28j})$ on obtient la droite de corrélation qui lie les deux variables réduites comme représenté sur la figure 2 (γ). Dans ce cas la résistance à 28 jours est mesurée expérimentalement (tableau 2). La chaleur à l'infini (Q_{inf}) est calculée par la modélisation de la courbe de dégagement de chaleur par la fonction exponentielle (modèle préalablement utilisé dans le projet national Français CALIBE) (Calibé, 2003).

Les paramètres a et b représentent la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite de lissage (figure 2 γ), ils valent : $a = 0,86$, $b = 0,27$.

Les énergies d'activation apparentes E_a des différents produits sont récapitulées dans le tableau 3 suivant.

Nom	BAPFC1	BAPFC2	BAPCV	BO4	BO 5	BO6	BO 7	CEN 71	CEN 1	CEN 2	CEN 3
Rc28j (MPa)	44,0	54,0	55,0	37,0	34,0	33,7	37,2	62,9	58,3	51,8	65,2
Ea (kJ/mol)	39,3	34,2	33,3	38,6	33,7	45,3	44,4	38,6	36,1	41,1	38,6

Tableau 3. Récapitulatif des résistances à la compression et à 28 jours des différents BAP et CEN mesurées expérimentalement ; énergies d'activation apparentes des différents bétons et CEN.

Ainsi, sur la figure 3, nous avons superposé les droites de corrélation entre les variables réduites $Rc(t_{\text{éq}})/Rc28j$ et $Q(t_{\text{éq}})/Q_{\text{inf}}$ pour tous les produits en les comparant deux à deux (béton et CEN).

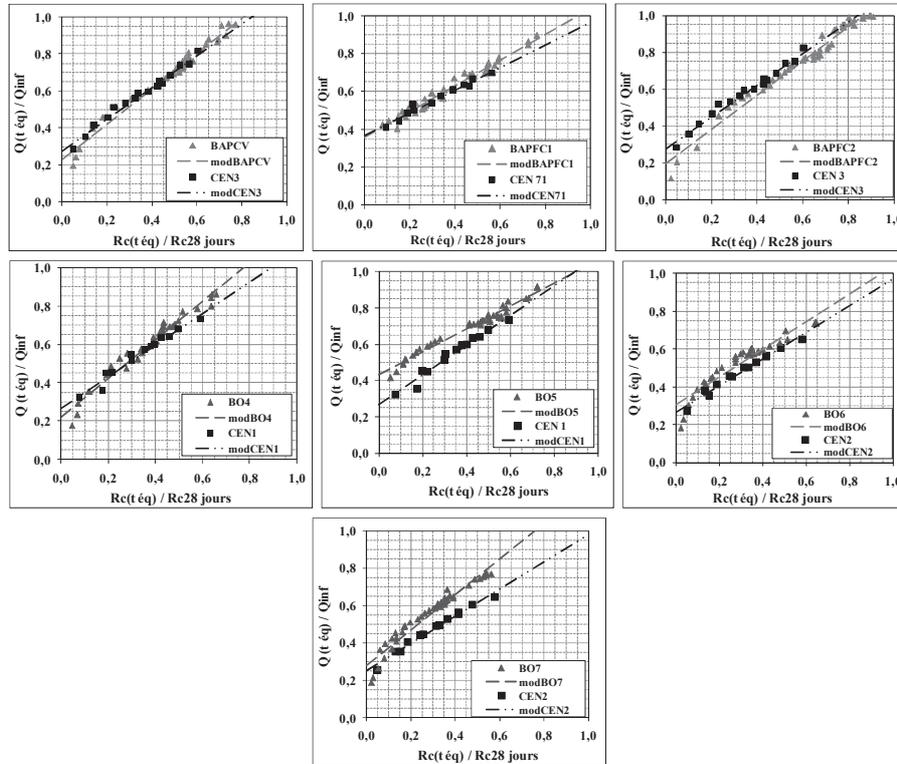


Figure 3. Superposition des droites de corrélation des variables réduites $[Q(t_{\text{éq}})/Q_{\text{inf}}$ en fonction de $Rc(t_{\text{éq}})/Rc28j]$ des bétons et mortiers CEN.

Les paramètres des droites de corrélation sont résumés dans le tableau 4 suivant :

	BAPFC1	BAPFC2	BAPCV	BO4	BO5	BO6	BO7	CEN1	CEN2	CEN3	CEN71
a	0,68	0,94	0,96	1,01	0,63	0,73	0,95	0,83	0,71	0,86	0,60
b	0,36	0,20	0,23	0,22	0,43	0,31	0,28	0,27	0,27	0,27	0,36

Tableau 4. Paramètres des droites de corrélation des bétons et des CEN.

En comparant les nuages de points des bétons et des CEN on constate que dans cinq cas sur sept nous avons une tendance semblable pour les points et donc les droites de corrélation. Pour le cas des BO5 et BO7, les nuages sont plus au moins différents et les courbes de corrélation béton et CEN se différencient alors. Ainsi le BO5 et son CEN présentent des origines et des pentes différentes, alors que le BO7 et son CEN ont quasiment la même origine, mais présentent des pentes différentes.

Ce résultat confirme à une certaine mesure l'hypothèse prise précédemment sur la similitude des paramètres a et b et donc l'utilisation de l'équation 2 pour la prévision de la montée en résistance du béton à partir des résultats du CEN.

Il est toute fois intéressant de signaler l'importance de bien renseigner les valeurs de R_{c28j} et de Q_{inf} pour une bonne appréciation des paramètres a et b.

4.2. Validation de la démarche proposée

En guise de la validation de la démarche proposée, nous avons représenté sur le même graphique les courbes de référence des bétons superposées aux courbes de montée en résistance prédites par l'équation 3. Pour cette dernière nous avons utilisé les paramètres a et b obtenus sur les CEN et la courbe de chaleur cumulée des bétons.

On rappelle que les courbes de référence des bétons de la figure 4 sont obtenues après exploitation des résultats expérimentaux des bétons.

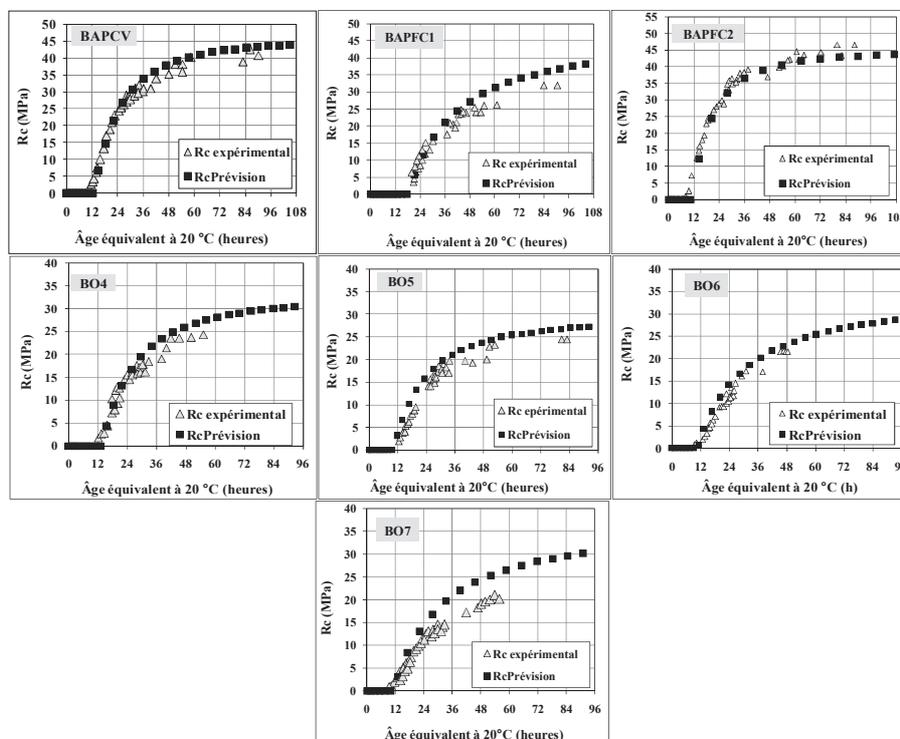


Figure 4. Superposition des courbes de références des bétons et des courbes de montées en résistances prédites des résultats sur CEN.

Les courbes de la figure 4 montrent que les résultats de prévision sont très satisfaisants. En effet avant 48 heures les courbes prédites sont confondues avec les courbes de référence des bétons. La résistance du BO5 présente une maturité légèrement avancée par rapport à ce que l'on a sur sa courbe de référence. Quant au BO7, il présente un écart d'amplitudes des résistances prédites par rapport aux résistances de la courbe de référence. Ces résultats traduisent exactement les écarts constatés sur les droites de corrélations bétons en CEN.

La différence d'origines des droites de corrélation n'a pas une grande incidence sur la prévision de la résistance. En effet, si l'on regarde les résultats de prévision du BO5 et ceux du béton réel, ils présentent la même allure de courbe avec un décalage de temps de l'ordre de 1 à 2 heures. Avec l'avancement dans l'âge les courbes s'ajustent. Contrairement, la différence de pente affecte plutôt la résistance aux âges plus évolués et joue un rôle important sur la qualité de prévision.

4.3. Utilisation des résultats pour la classification des bétons

Dans cette partie on va vérifier si on arrive à retrouver une classification des résistances prédites corrélable aux résistances mesurées sur bétons. Pour y parvenir, on a relevé, sur une plage habituellement utilisée dans le cadre de la maturométrie (24 heures et 48 heures), les valeurs des résistances prédites et des résistances réelles obtenues à partir des résultats expérimentaux. On a par la suite représenté sur deux graphiques différents les valeurs prédites en fonction des valeurs réelles (figure 5).

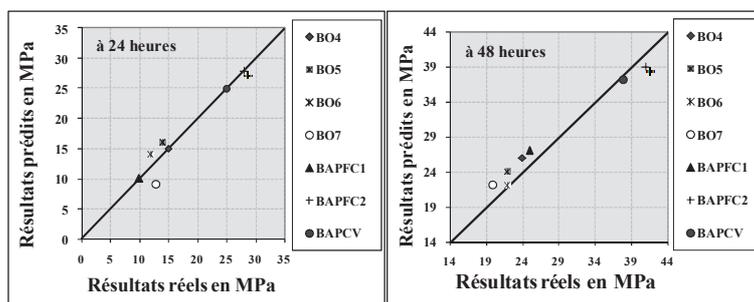


Figure 5. Classification des résultats de prévision en fonction des résultats obtenus sur bétons à 24 heures d'âge (fig de gauche), à 48 heures d'âge (fig de droite)

Les résultats de comparaison montrent que l'on retrouve une bonne classification (selon la diagonale) des résultats prédits par rapport aux résultats réels des différents produits, et cela pour les deux âges choisis (24 heures et 48 heures).

Au final, les résultats présentés sur la figure 5 nous permettent de valider la méthode en terme de classification des formules de béton entre elles. Les classifications obtenues par prévision se corrélaient de la bonne façon aux résultats expérimentaux obtenus aux mêmes âges pour les différentes formules.

5. Conclusions

Au terme de cette étude, nous proposons une nouvelle méthode expérimentale complémentaire à la méthode de maturométrie sur béton connue pour ses difficultés en terme de nombre d'essais à réaliser ou de personnes à mobiliser. Cette méthode se base sur le principe d'utilisation du mortier normalisé pour calculer les données nécessaires pour établir une courbe de référence du béton.

L'objectif dans cette méthode est d'alléger le nombre d'essais expérimentaux nécessaires à réaliser dans le cadre de pré-études pour la comparaison de la montée en résistance au jeune âge de différentes formules de béton : de pouvoir établir une

classification en résistance pour une échéance donnée, ou une classification en temps pour une résistance donnée.

Pour la validation de la méthode, nous avons vérifié les hypothèses sur lesquelles est fondée la démarche : similitude des droites de corrélation des variables réduites des bétons et des CEN. De plus, nous avons comparé la qualité de superposition des courbes de référence prédites à celles obtenues réellement sur bétons.

Globalement, la méthode est satisfaisante, sans toutefois pouvoir être utilisée en dehors du cadre de pré-études. Dans ce cadre, ces résultats peuvent être utilisés comme outils de comparaison des différentes formules entre elles et ce pour un coût largement inférieur à ce qui était pratiqué jusqu'à maintenant.

Bibliographie

- D'Aloïa L., Détermination de l'énergie d'activation apparente du béton dans le cadre de l'application de la méthode du temps équivalent à la prévision de la résistance à la compression au jeune âge, Thèse de doctorat de ENPC, France, 1998.
- Beek A van, *Dielectric properties of young concrete – Non destructive dielectric sensor for monitoring the strength development of young concrete*, Delft University Press, 2000.
- Byfors J., Plain concrete at early ages, Swedish cement and concrete research, Institute report 3:80, Stockholm, 464pp, 1980.
- Calibé. « La maturométrie » Résistance du béton dans l'ouvrage : guide technique, édition LCPC, mars 2003.
- Chanvillard G, d'Aloïa.L. Prevision of concrete early age compressive strength -Application of the equivalent age method, Bulletin de liaison des L des P. et Ch, 193 39-51, 1994
- Haddad O, Contribution au développement d'outils d'aide à la formulation des bétons autoplaçants (BAP) relatifs à la rhéologie à l'état frais et à la résistance au jeune âge, thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, Décembre 2007.
- Waller V, Formulation et prédiction des résistances des bétons – mise au point du modèle de courbe de référence, rapport interne CTG réf I45000024, Août 2000.